

ДЕТЕКТОРЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ЭФФЕКТЕ УПРУГОГО КОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ АНТИНЕЙТРИНО НА ЯДРАХ ТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

DETECTORS BASED ON THE EFFECT OF ELASTIC COHERENT SCATTERING OF ANTINEUTRINOS BY THE NUCLEI OF HEAVY ELEMENTS

О. М. Бояркин^{1,2}, А. А. Будько^{1,2}

O. M. Boyarkin^{1,2}, A. A. Budko^{1,2}

¹Белорусский государственный университет, БГУ

²Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ, г. Минск, Республика Беларусь
kfm@iseu.by, budko.anzhelika@gmail.com

¹Belarusian State University, BSU

²International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus

В данной работе рассматриваются детекторы, основанные на эффекте упругого когерентного рассеяния антинейтрино на ядрах тяжелых элементов. Представлены существующие детекторы, основанные на процессе обратного бета распада.

In this paper detectors based on the effect of elastic coherent scattering of antineutrinos on nuclei of heavy elements are considered. Existing detectors based on the process of inverse beta decay are presented.

Ключевые слова: реакция обратного бета-распада, детектирование антинейтрино, мониторинг атомных реакторов.

Keywords: inverse beta decay, antineutrino detection, nuclear reactor monitoring.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2022-2-248-251>

На сегодняшний день нейтрино остается одной из самых малоизученных частиц в современной физике. Будучи экспериментально обнаружено в 1956 году, оно и сейчас слабо поддается детальным исследованиям. Содействуют этому отсутствие у него электрического заряда, малая величина электрического и магнитного дипольных моментов, исчезающе малая масса (порядка нескольких эВ), а также очень маленькое сечение взаимодействия с другими элементарными частицами.

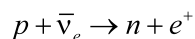
К настоящему времени проведено множество экспериментов, посвященных исследованию нейтрино. Но зарегистрировать (анти)нейтрино довольно сложно, что подводит нас к следующему выводу - для того, чтобы в каком-либо из экспериментов набрать достаточное количество статистики, необходимо иметь очень мощный источник (анти)нейтрино. Условно источники нейтрино можно разделить на два вида: естественные и искусственные. Естественные включают источники внеземного происхождения, такие как Солнце или вспышки сверх- и гиперновых звезд. Искусственные источники, в свою очередь, также могут быть двух типов: лабораторные (ускорительные комплексы) и атомные реакторы. Именно последние позволяют проводить исследования без огромного вложения средств, так как атомный реактор – коммерческое предприятие, а нейтринное излучение в нем носит сопутствующий характер.

Для оптимального функционирования ядерного реактора необходимо напрямую «видеть» то, что происходит внутри активной зоны работающего реактора. Причем следить за состоянием активной зоны следует в режиме реального времени. Знание того, насколько равномерно по объему активной зоны выгорает ядерное топливо, важно не только для безопасности работы реактора, но и с финансовой точки зрения: оно позволит оптимизировать работу реактора, повысит эффективность выработки ядерного топлива. Физическая проблема тут заключается в том, что в ядерный реактор просто так не заглянешь. Существует аппаратура контроля нейтронного потока, но она позволяет только следить за общей мощностью реактора, а восстанавливать по ее показаниям объемную равномерность выгорания топлива можно лишь очень опосредованно.

Для прямого дистанционного наблюдения за активной зоной приходится использовать частицы со сверхвысокой проникающей способностью, и естественным кандидатом для этого являются антинейтрино. Эти частицы в большом количестве рождаются в ядерном реакторе и разлетаются из активной зоны, не замечая ни стенок реактора, ни окружающие постройки. Только в очень редком случае антинейтрино встречает всё же какой-то атом окружающего вещества и инициирует ядерную реакцию – именно так антинейтрино и регистрируют в детекторах. К сожалению, вероятность такого события чрезвычайно мала. Однако поскольку нейтринный поток от реактора огромен, то достаточно крупный детектор все-таки может не только надежно зарегистрировать реакторные

антинейтрино, но и измерить их поток. Если несколько таких детекторов поставить с разных сторон реактора то, сравнивая их показания, можно будет провести томографию активной зоны реактора – то есть выяснить, насколько однородно там выгорает топливо.

До настоящего времени в основе работы анти нейтринного детектора использовалась реакция обратного бета-распада:



Антинейтрино захватывается ядрами водорода, превращает протон в нейтрон и излучает позитрон. Далее позитрон аннигилирует с электроном мишени с испусканием фотона с четко определенной энергией 511 кэВ. Что же касается нейтрона, то он возбуждает ядро, специально введенного в установку гадолиния, а возбуждение получившегося ядра снимается испусканием фотона с граничной энергией до 8 МэВ. При этом характерное время между двумя этими событиями составляет 30–40 мкс, что делает сигнатуру захвата нейтрино очень четкой и позволяет эффективно отсекаать сигнал от фона.

К настоящему времени существующие антинейтринные детекторы используются на АЭС и для научно-исследовательских целей [1]. Например, для Турецкой АЭС конструируется детектор на основе гексагональных сцинтилляторов. Национальная лаборатория Сандия совместно с Ливерморской национальной лабораторией разработали детектор SONGS1, который в настоящее время установлен возле атомного реактора SONGS мощностью 3,46 ГВт в Калифорнии (США). Данный детектор расположен в 24,5 м от реакторной зоны, за пределами бетонной защиты, что обеспечивает значительное снижение потока реакторных нейтронов и гамма-квантов. Детектор расположен на глубине 10 м под поверхностью Земли, что позволяет снизить поток космических мюонов в 7 раз. На АЭС Daya Bay, расположенной в 52 километрах к северу от Гонконга, работает установка, состоящая из восьми антинейтринных жидкосцинтилляционных детекторов, которые расположены в трёх экспериментальных залах. Источником антинейтрино являются шесть атомных реакторов с тепловой мощностью каждого около 3 ГВт, располагающихся на расстояниях от ~500 до ~1800 метров от детекторов В России, совместными усилиями Объединенного института ядерных исследований, Московского инженерно-физического института, а также Московского физико-технического института создан детектор реакторных антинейтрино на основе твердого сцинтиллятора DANSS. Компактный (1м³) сильно-сегментированный (2500 пластин из пластического сцинтиллятора) антинейтринный спектрометр DANSS нацелен на поиск осцилляций в стерильном нейтрино, а также мониторинга мощности реактора и состава ядерного топлива. Спектрометр окружен пассивной и активной защитами и смонтирован на подвижной платформе под 4-м энергоблоком КАЭС. Измерения ведутся на рекордно малых расстояниях – 10–12 м от центра промышленного реактора. Данный детектор, сможет регистрировать порядка 5000 антинейтрино в сутки.

Сегодня мы наблюдаем прорыв в конструировании антинейтринных детекторов, который связан с использованием в качестве рабочей реакции детектора, процесса упругого когерентного рассеяния антинейтрино (УКРН) на ядрах тяжелых элементов.

Процесс УКРН на атомном ядре связан с соотношением неопределенности, а именно: при малых значениях импульса, переданного ядру, нейтрино взаимодействует не с отдельными его составляющими (нуклонами), а сразу со всем ансамблем, то есть когерентно [2]. Возможность такого процесса впервые была рассмотрена практически одновременно российскими и американскими учеными. Сечение такого процесса относительно велико, оно более чем на два порядка величины (для тяжёлых ядер) превосходит сечение других известных процессов взаимодействия нейтрино низких энергий. УКРН на атомном ядре превалирует при взаимодействии нейтрино с атомами и играет важную роль во Вселенной в процессах, сопровождающихся интенсивными потоками нейтрино. До недавнего времени, однако, не было экспериментальных подтверждений рассматриваемого процесса из-за больших технических трудностей его регистрации– энерговыделение при упругом когерентном рассеянии на тяжёлом ядре для нейтрино, имеющих энергию несколько десятков МэВ, происходит в кэВ-ной области, а для антинейтрино от ядерного реактора, средняя энергия которых составляет около 2 МэВ, в области нескольких сотен электронвольт. При этом для регистрации УКРН необходим низкопороговый детектор с большой массой, работающий в условиях низкого радиационного фона.

Процесс УКРН впервые наблюдался в 2017 году в международном эксперименте COHERENT на ускорительном комплексе Spallation Neutron Source (SNS) в Окриджской национальной лаборатории США при участии сотрудников межкафедральной лаборатории экспериментальной ядерной физики НИЯУ МИФИ в потоке нейтрино трёх различных типов (мюонных нейтрино и антинейтрино, и электронных нейтрино) с помощью 14,6 кг сцинтилляционного детектора. Более детальное изучение процесса УКРН требует его исследования на источниках нейтрино одного типа, например, электронных антинейтрино на ядерном реакторе.

После первого наблюдения процесса УКРН на атомном ядре стало очевидным, что исследования будут продолжены с использованием более чувствительных детекторов, а также в области более низких энергий, характерной для реакторного антинейтрино. Эта область является наиболее трудной, но, с другой стороны, и наиболее интересной с научной и практической точек зрения (нейтринный мониторинг ядерных реакторов). Поскольку задача первого наблюдения данного процесса уже перестаёт быть актуальной, ставка должна делаться на детекторы большой массы, с помощью которых можно проводить детальные исследования с большой статистической значимостью.

На сегодняшний день известно около десяти экспериментов, направленных на исследование УКРН при помощи различных детекторных технологий: COHERENT Окридж, США; CONNIE АЭС Ангра-2, Бразилия; νGeN

Калининская АЭС, Россия; CONUS АЭС Брокдорф, Германия; RICOCHET Гренобль, Франция; MINER Исследовательский реактор, США.

Несмотря на многообразие существующих экспериментальных программ, с точки зрения исследования УКРН, требующего массивного низкогопорогового детектора, наиболее перспективным выглядит использование двухфазных эмиссионных детекторов на сжиженных благородных газах, обладающих высокой чувствительностью к событиям с малым ионизационным выходом.

Детектором такого класса, вблизи ядерного реактора, является эмиссионный двухфазный детектор на жидком ксеноне РЭД-100 (Russian Emission Detector) [3]. Установка РЭД-100 нацелена на поиск и регистрацию редких событий в виде ядер отдачи с энерговыделением в килоэлектронвольтовой области в присутствии достаточно интенсивного фона, связанного, в частности, с космогенными мюонами. Такие условия характерны для работы детекторов, расположенных в нормальных лабораторных условиях практически на земной поверхности, в отличие от известного класса эмиссионных двухфазных детекторов, предназначенных для поиска темной материи и находящихся в низкофонных лабораториях, в глубоком подземелье.

Двухфазный эмиссионный детектор РЭД-100 предназначен для регистрации упругого когерентного рассеяния антинейтрино на ядрах в условиях наземной лаборатории. Детектор включает 200 кг жидкого ксенона, находящегося в дрейфовом объеме. Регистрация фотонов с длиной волны ~ 175 нм из дрейфового объема детектора осуществляется посредством двух матриц по 19 штук низкотемпературных УФ-чувствительных ФЭУ. Работа РЭД-100 поддерживается несколькими системами, соединенными в единую установку. Детектор располагается внутри титанового криостата, а для его термостабилизации при температуре жидкого ксенона ~ 170 К применяется криогенная система на базе термосифонной технологии. Для удаления электроотрицательных и молекулярных примесей из ксенона применяется система очистки, а сигналы с двух матриц ФЭУ записываются системой сбора данных. С целью минимализации уровня радиоактивности вблизи чувствительного объема детектора, потенциально радиоактивные компоненты вынесены за пределы пассивной защиты, а в конструкции самого детектора использованы низкофонные материалы. Детектор соединяется с основными системами через интерфейсный модуль при помощи гибких металлоукавок, в которых проходят высоковольтные и сигнальные кабели, а также газовые коммуникации.

В основе работы детектора РЭД-100 лежит эмиссионный принцип регистрации ионизирующих частиц. Взаимодействуя с плотной рабочей средой детектора, ионизирующая частица теряет свою энергию на возбуждение атомов жидкого ксенона и ионизацию. Переход возбужденных атомов ксенона в основное состояние приводит к генерации сцинтилляции. Образовавшиеся в процессе ионизации электроны вытягиваются электрическим полем в газовую фазу. При дрейфе в газе при наличии достаточно сильного электрического поля электроны возбуждают атомы среды, что приводит к генерации второго светового сигнала. Для регистрации световых сигналов применяются ФЭУ, разработанные для работы в жидком ксеноне и чувствительные к данной длине волны.

Установка РЭД-100 способна решить вопрос нераспространения ядерного оружия. Дело в том, что спектр испускаемых нейтрино сильно зависит от состава реакторного топлива. В процессе реакторной кампании его состав сильно меняется: уран выгорает, а плутоний образуется. Если же из реактора производится выемка оружейного плутония и замена его ураном, это сразу воздействует на спектре антинейтрино. Состав ядерного топлива в реакторе можно определять по количеству антинейтрино и их энергии. Таким образом, международные органы контроля смогут обнаружить производство оружейного плутония. Детектор сможет работать длительное время и предоставлять информацию в реальном времени о состоянии реактора. Благодаря высокой проникающей способности нейтрино с помощью детектора РЭД-100 можно будет дистанционно проводить так называемую «томографию» активной зоны реактора, изучать ее изотопный состав. Создание такого прибора значительно повысит безопасность мировой атомной энергетики в целом. Данный прибор не имеет аналогов в мире. Он не только регистрирует потоки нейтрино, но и позволяет полностью контролировать процессы, происходящие в активной зоне реактора. Компактность прибора позволяет в будущем создать мобильную установку для независимого контроля за активной зоной ядерных реакторов.

Эксперименты с нейтрино на атомных станциях, в настоящее время, являются одним из самых перспективных направлений физики частиц и обладают большим потенциалом для будущих исследований. Они не требуют многомиллионных вложений и решают заманчивые экспериментальные задачи. Процесс УКРН имеет фундаментальное значение для описания процессов формирования Вселенной и эволюции звезд. Отклонения измеренного сечения взаимодействия УКРН от предсказаний Стандартной Модели могут быть использованы для поиска явлений за ее пределами. Кроме того, процесс УКРН можно использовать для изучения ядерных форм-факторов и магнитного момента нейтрино. Упругое когерентное рассеяние солнечных и атмосферных нейтрино является фоном для следующего поколения экспериментов по прямому поиску темной материи в виде массивных слабо-взаимодействующих частиц, поэтому экспериментальная информация о величине сечения УКРН поможет увеличить чувствительность этих экспериментов. Процесс УКРН также имеет важное значение для создания новой генерации относительно компактных детекторов для мониторинга состояния активной зоны ядерных реакторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Применение детекторов антинейтрино в ядерной безопасности: текущие возможности и будущие перспективы / А. Бернштейн [и др.] – 3-е изд., испр. – М. : Наука и всеобщая безопасность, 2010. – 398 с.
2. Упругое когерентное рассеяние нейтрино на атомном ядре - недавно обнаруженный тип взаимодействия нейтрино низких энергий : сб. ст. / Успехи физических наук ; под ред. О. В. Руденко [и др.] – М., 2019. – 173–186 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА ПОЛЯ И ИЗМЕНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА МАЛЫХ ПОЛЕЙ

DETERMINATION OF THE FIELD SIZE AND CHANGING THE ENERGY SPECTRUM OF SMALL FIELDS

B. C. Пискунов, С. В. Семёнов, Т. С. Чикова

V. S. Piskunov, S. V. Semenov, T. S. Chikova

*Витебский областной клинический онкологический диспансер,
г. Витебск, Республика Беларусь
x_serg@tut.by*

Healthcare Institution «Vitebsk Regional Clinical Oncological Center», Republic of Belarus

Изложены основные определения размера поля и разница между геометрическим и радиационным размерами у малых полей. Описаны изменения в энергетическом спектре фотонов с уменьшением размера поля. Показано, что размер полной ширины на половине максимума (full width at half maximum – FWHM) латерального профиля пучка является наиболее показательным и существенным параметром размера поля для точной дозиметрии малых полей. При описании данных по малым полям рекомендуется указывать как FWHM, так и геометрический размер поля.

The basic definitions of the field size and the difference between the geometric and radiation dimensions of small fields are described. Changes in the energy spectrum of photons with decreasing field size are described. It is shown that the full width at half maximum (FWHM) size of the lateral beam profile is the most indicative and essential parameter of the field size for accurate dosimetry of small fields. When describing data on small fields, it is recommended to specify both the FWHM and the geometric size of the field.

Ключевые слова: геометрический размер поля, радиационный размер поля, малые поля, латеральный профиль пучка, коллиматор, линейный ускоритель.

Keywords: geometric field size, radiation field size, small fields, lateral beam profile, collimator, linear accelerator.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2022-2-251-254>

В настоящее время благодаря использованию стандартных и дополнительных многолепестковых коллиматоров и лечебных аппаратов нового поколения в дистанционной лучевой терапии растёт использование малых статических полей. Повышается интерес к использованию таких методик облучения, как стереотаксическая радиохирurgia, стереотаксическая лучевая терапия тела, лучевая терапия с модуляцией интенсивности, в которых также широко используются малые поля. Точная дозиметрия малых полей важна при вводе в эксплуатацию линейных ускорителей.

Использование малых полей связано с увеличением неопределённости при проведении клинической дозиметрии. Наблюдаемые дозиметрические погрешности оказывают большее влияние на предполагаемый результат курса лучевой терапии, чем при использовании стандартных радиационных полей. В связи с этим решение проблемы дозиметрии радиационных полей малых размеров, требований к ним и определение физических условий, при которых внешний фотонный пучок может быть обозначен как малое поле является важно научно-практической задачей.

Международная электротехническая комиссия (IEC) предоставляет два различных определения размеров поля [1]:

– Геометрический размер поля определяется как геометрическая проекция открытия коллиматора от источника излучения на плоскость, перпендикулярную оси пучка;

– Радиационный размер поля - величина области, определяемая изодозными линиями в плоскости, перпендикулярной оси пучка излучения.

Геометрического размер поля соответствует световому полю, что соответствует настройке коллиматора с плоскими краями, т.е. формирующего только прямоугольные поля. В широких пучках размер полной ширины на половине максимума (full width at half maximum – FWHM) латеральных профилей, то есть радиационный размер поля, определённый на уровне 50% относительной дозы, равен размеру поля, определённому настройками коллиматора, что соответствует геометрическому размеру поля. В этом случае, размер поля, определённый